

ciel par *ISO* caractérise des molécules contenant au moins une dizaine, voire une centaine de cycles.

Les glaces moléculaires

Des centaines de molécules ont été identifiées dans le milieu interstellaire, mais comment des molécules complexes se forment-elles dans l'espace? Même dans les régions les plus denses, le gaz interstellaire est très ténu (à peine dix millions de molécules par litre), et les collisions entre atomes ou entre molécules sont rares. Toutefois, les molécules complexes se forment nécessairement par réaction d'atomes ou de molécules simples, qui doivent donc se trouver côte à côte à un certain moment.

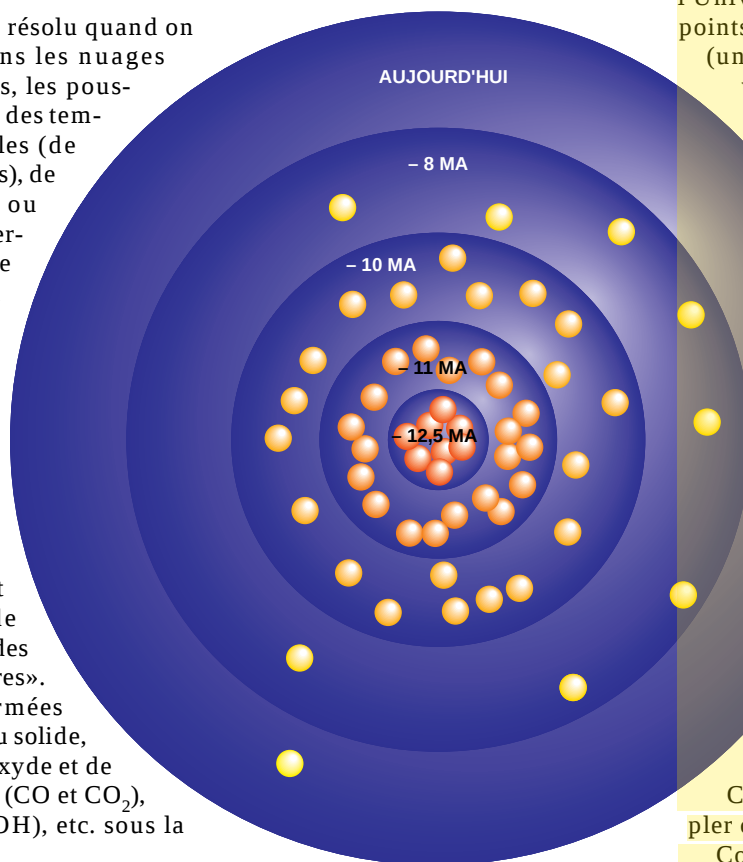
Le mystère a été résolu quand on a observé que, dans les nuages moléculaires denses, les poussières sont parfois à des températures très faibles (de l'ordre de dix kelvins), de sorte qu'un atome ou une molécule qui percutent un grain (de rayon inférieur à un micromètre) restent collés à celui-ci, en raison de forces très faibles, nommées forces de Van der Waals (voir la figure 3).

Ainsi, les poussières se recouvrent progressivement d'un manteau de molécules, formant des «glaces interstellaires». Ces glaces sont formées non seulement d'eau solide, mais aussi de monoxyde et de dioxyde de carbone (CO et CO₂), de méthanol (CH₃OH), etc. sous la forme solide.

Des noyaux d'hydrogène qui se propagent à grande vitesse dans le milieu interstellaire, ainsi que des photons provenant des étoiles, irradient ces glaces et leur confèrent beaucoup d'énergie. Les molécules étant à proximité les unes des autres, l'énergie apportée aux atomes ou aux molécules des grains leur permet des associations chimiques et la formation de nouvelles molécules. Parfois les nouvelles espèces formées sont libérées dans le gaz : l'échange est permanent entre les molécules collées sur

les surfaces et les molécules présentes dans le gaz.

Le satellite *ISO* a identifié les molécules qui constituent les manteaux de glaces : les vibrations et rotations des molécules correspondent à des absorptions ou à des émissions dans le spectre infrarouge, à des longueurs d'onde caractéristiques des diverses molécules (voir la figure 3). Les étoiles nées dans ces nuages moléculaires émettent un rayonnement qui détruit le nuage de poussières où elles se sont formées et qui rejette ainsi toutes les molécules dans la phase gazeuse. Ces molécules voyagent dans notre Galaxie et participent à nouveau à la formation de nuages interstellaires,



6. LE SATELLITE *ISO* A OBSERVÉ DES GALAXIES qui contribuent au fond diffus extragalactique. Ce fond provient de l'émission cumulée de toutes les galaxies depuis les premiers instants de l'Univers. Comme la lumière se propage à vitesse finie, plus les galaxies sont éloignées, plus on les voit dans le passé. Leurs émissions sont de plus en plus décalées vers les grandes longueurs d'onde. De ces émissions, on a déduit que pour une étoile de type Soleil formée aujourd'hui, il s'en formait 8 il y a 8 milliards d'années, 20 il y a 10 milliards d'années, 20 il y a 11 milliards d'années, 10 il y a 11,5 milliards d'années, 4 il y a 12 milliards d'années (sur cette figure, les échelles de taille de l'Univers ne sont pas respectées).

et ainsi de suite. Ce cycle de matière est à l'origine de l'enrichissement moléculaire de notre Galaxie au cours du temps.

Les observations cosmologiques

Les instruments du satellite *ISO* nous ont révélé la nature de la matière interstellaire dans le voisinage du Système solaire et donné des informations sur l'Univers dans son ensemble. Parmi les grandes questions de la cosmologie contemporaine figure celle de la formation des galaxies et, plus généralement, celle de l'histoire de la formation des étoiles.

L'astrophysique suppose que l'Univers est identique en tous ses points. Pas à petite échelle, bien sûr (une étoile n'est pas identique au vide interstellaire où elle se trouve), mais à l'échelle des distances intergalactiques.

Selon cette hypothèse, les rayonnements émis par un élément chimique, tel l'hydrogène, devraient toujours être à la même longueur d'onde. Pourquoi, alors, les galaxies qui nous entourent émettent-elles des rayonnements qui semblent décalés vers les grandes longueurs d'onde? En 1929, l'astronome américain Edwin Hubble montra que plus les galaxies sont éloignées, plus leur rayonnement est décalé vers les grandes longueurs d'onde. Ce décalage est un effet Doppler cosmologique.

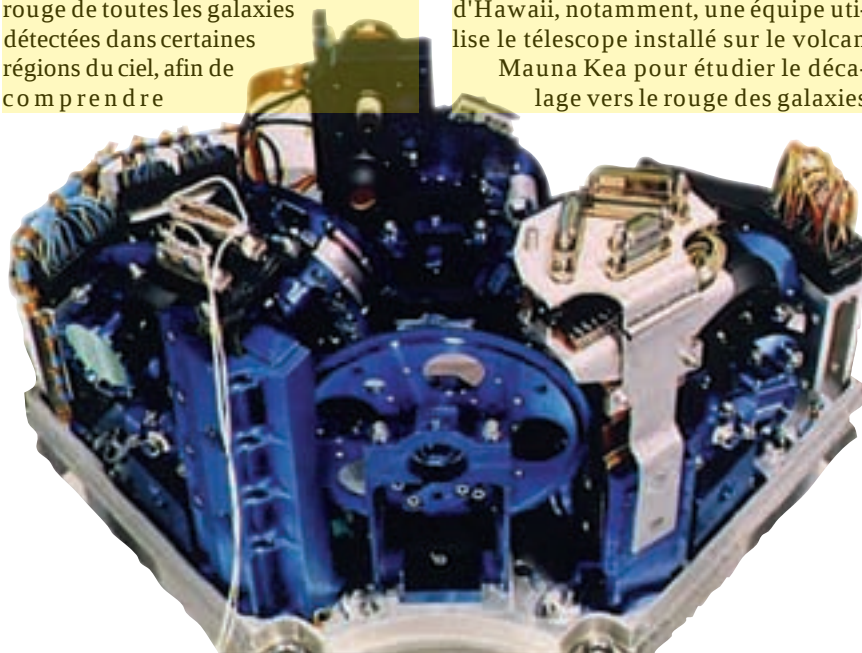
Comme les sources décalées vers le rouge sont des sources éloignées de la Terre et comme la lumière se propage à la vitesse de 300 000 kilomètres par seconde, le rayonnement qui est le plus décalé a voyagé sur de longues distances et a donc mis beaucoup de temps à nous parvenir : en regardant aux grands décalages vers le rouge, les astronomes explorent le passé de l'Univers.

La galaxie la plus lointaine jamais détectée se trouve à un décalage vers le rouge de l'ordre de 6,7, ce qui correspond à un Univers ayant dix pour

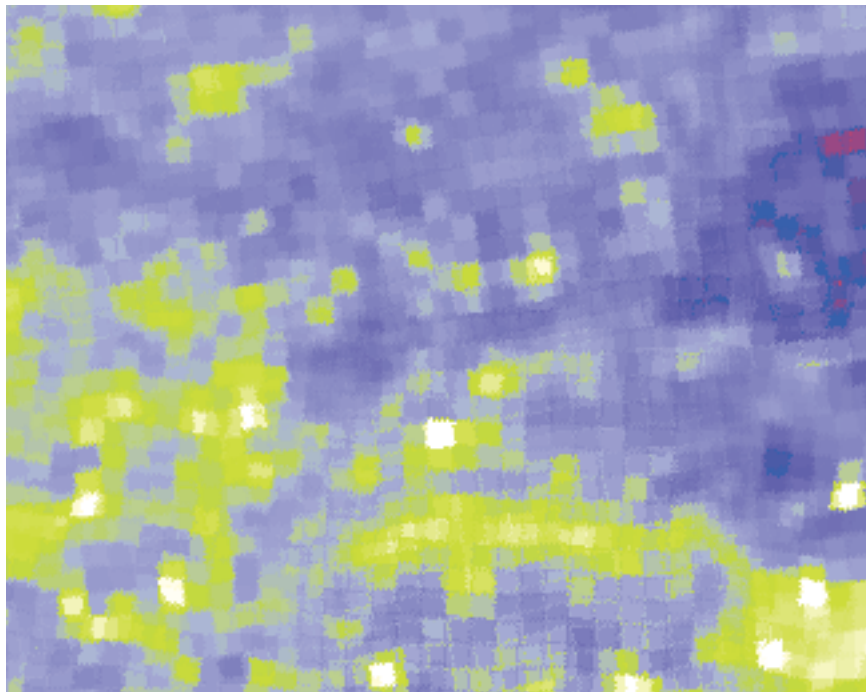
cent de son âge actuel (estimé à 12,6 milliards d'années). Aujourd'hui, les astrophysiciens mesurent systématiquement le décalage vers le rouge de toutes les galaxies détectées dans certaines régions du ciel, afin de comprendre

comment se sont formées les galaxies, et comment elles ont évolué vers les galaxies qui nous entourent.

À l'Observatoire franco-canadien d'Hawaii, notamment, une équipe utilise le télescope installé sur le volcan Mauna Kea pour étudier le décalage vers le rouge des galaxies



7. LA CAMÉRA ISOCAM embarquée sur le satellite *ISO* a été fabriquée sous la responsabilité de Catherine Césarsky et de ses collègues du CEA, et testée à l'Université d'Orsay. Cette caméra enregistre les rayonnements infrarouges à des longueurs d'onde comprises entre 2 et 16 micromètres. Le champ angulaire de la caméra était remarquablement petit : quelques secondes d'arc seulement, soit un cheveu vu à 20 mètres de distance.



8. CE CHAMP PROFOND a été observé par l'instrument *ISOPHOT* à une longueur d'onde de 175 micromètres. Cette carte ne représente qu'une très petite partie du ciel. Les filaments brillants (*en vert*) correspondent à de la matière présente dans notre Galaxie ; cette matière est située au premier plan. Se superposent ensuite des sources ponctuelles (*points verts isolés ou blancs*) qui, elles, sont extragalactiques. Ces sources sont des galaxies, parfois très jeunes (elles se sont formées quand l'Univers n'avait que trois milliards d'années, contre 13 aujourd'hui). En dehors des filaments brillants et des sources ponctuelles, on distingue un fond granuleux (*en bleu*), qui correspond à l'ensemble des sources extragalactiques non résolues.

dans cinq champs qui mesurent chacun quelques minutes d'angle de côté. C'est ainsi qu'est apparue une augmentation considérable (un facteur dix environ) de la fréquence de formation d'étoiles entre l'époque actuelle et il y a cinq milliards d'années.

Ce résultat a été confirmé et étendu à l'aide du Télescope spatial *Hubble*, qui a accumulé, sur un même champ du ciel, des centaines d'heures d'observation, fournissant l'image la plus profonde jamais obtenue en astronomie optique. Ces observations semblaient également indiquer un maximum d'activité de formation d'étoiles il y a cinq milliards d'années.

Toutefois, pour notre Galaxie, la découverte des poussières, évoquée précédemment, a montré qu'une grande partie du rayonnement était invisible parce que absorbé. Qu'en est-il pour les galaxies lointaines ? Cette question est restée controversée. L'écran de poussière est-il homogène, c'est-à-dire les poussières sont-elles réparties de façon diffuse, cachant de la même façon tous les objets distants ? Ou bien les poussières sont-elles confinées à l'intérieur même des galaxies ?

Il y a un peu plus de dix ans, le satellite *IRAS* corrobora la seconde hypothèse en découvrant des « galaxies infrarouges » : ces galaxies forment beaucoup plus d'étoiles que notre Galaxie, par exemple, et elles émettent jusqu'à 95 pour cent de leur énergie dans le domaine infrarouge. Manifestement le recensement des étoiles dans l'Univers était biaisé quand les astronomes n'étudiaient que les rayonnements visibles.

On sait aujourd'hui que, lors des collisions entre les galaxies, la formation d'étoiles peut être centuplée, mais invisible, en raison des considérables concentrations de gaz et de poussières, qui absorbent le rayonnement. Ce sont de telles collisions qui engendrent les galaxies infrarouges découvertes par *IRAS*.

Ces épisodes ne sont-ils que de spectaculaires événements, trop rares et trop courts, dans la vie des galaxies, pour influencer leur évolution ? Ou au contraire, les collisions de galaxies, fréquentes dans le passé, ont-elles joué un rôle majeur dans leur évolution ? Dans cette dernière hypothèse, une bonne partie de l'histoire de la formation d'étoiles dans l'Univers ne serait observable que dans le domaine infrarouge.